

# **Transferencia de energía sin contacto**

RAQUEL MONTALVO CANO

Departamento de electricidad  
Universidad Carlos III de Madrid  
Leganés, España 2012

Department of Energy and Environment  
*Division of Electric Power Engineering*  
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Göteborg, Sweden 2012

## INTRODUCCIÓN

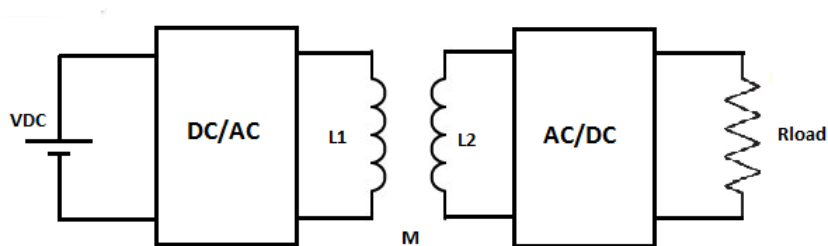
En este proyecto se han estudiado la transferencia de energía y el acoplamiento entre dos bobinas acopladas usando un núcleo de ferrita. Se han hecho algunas aproximaciones de los parámetros magnéticos, inductancias, mediante cálculos analíticos del circuito magnético, así como simulaciones con FEMM. A continuación, se hizo el montaje del sistema en el laboratorio, y se tomaron medidas reales con las que se calcularon los mismos parámetros, pudiendo de esta manera comprobar los valores calculados previamente. Para finalizar, se hicieron varias medidas, para comprobar la influencia en la transferencia de potencia del sistema de varios parámetros de diseño, frecuencia, número de vueltas de las bobinas, “air gap”.

La conclusión general de la comparación de los valores obtenidos en el laboratorio con los valores calculados a través de simulaciones y cálculos analíticos es que es posible alcanzar aproximaciones bastante tolerables con cálculos muy simples. En cuanto a las medidas experimentales, se llegó a que cuando se varía la frecuencia, dejando fijos el resto de parámetros, la eficiencia máxima, 18 %, es alcanzada trabajando a 50 kHz y con una resistencia de carga en torno a 40  $\Omega$ . Cuando se varía el número de vueltas de las bobinas, manteniendo el resto de parámetros fijados a un valor, se llegó a que la mejor eficiencia, que fue del 23%, fue alcanzada con bobinas de 20 vueltas y con una resistencia de carga de aproximadamente 20%.

## PUESTA EN MARCHA

### INTRODUCCIÓN

El sistema completo se presenta en la Figura 1. Consiste en una fuente de corriente continua que alimenta un convertidor DC/AC, cuya salida es una señal cuadrada de alta frecuencia, que a su vez alimentará la bobina primaria. El flujo magnético fluye desde la bobina primaria hasta la secundaria e induce una corriente en ésta. La señal alterna que llega al secundario es rectificadora a continua, para alimentar así la resistencia de carga.



*Figura 1. Sistema completo*

En la Figure 2 se puede ver el montaje total del sistema en el laboratorio.

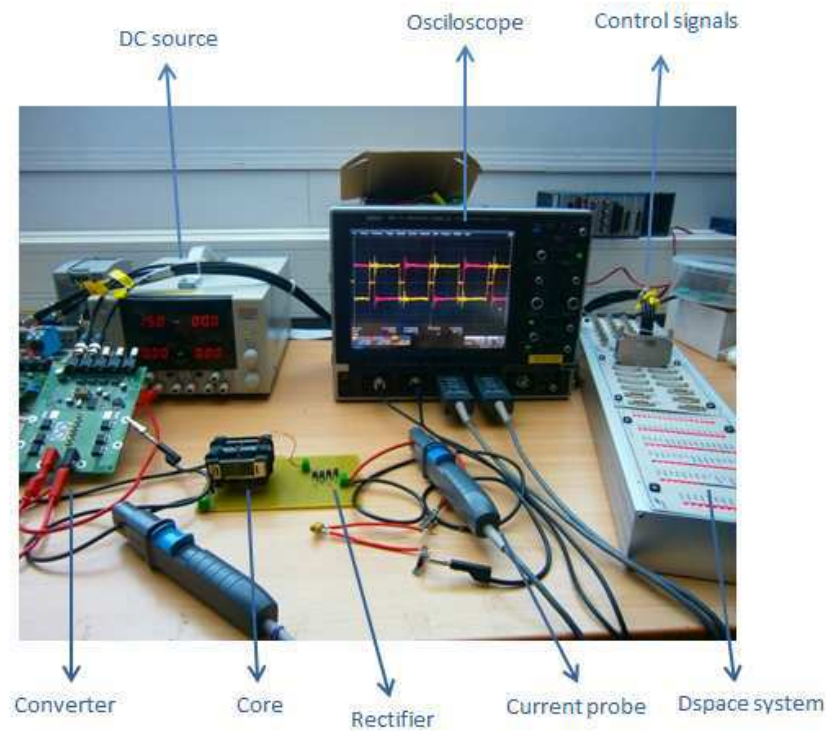


Figura 2. Montaje total del sistema en el laboratorio

## PRIMARIO

En la Figura 3 se puede ver un esquema del lado primario del sistema. El primario del transformador es alimentado por una señal cuadrada de alta frecuencia. Para generar esta señal, se utiliza un convertidor DC/AC, que está alimentado por corriente continua. Para controlar los transistores de este circuito DC/AC, se necesitan dos señales cuadradas con un desfase entre ellas.

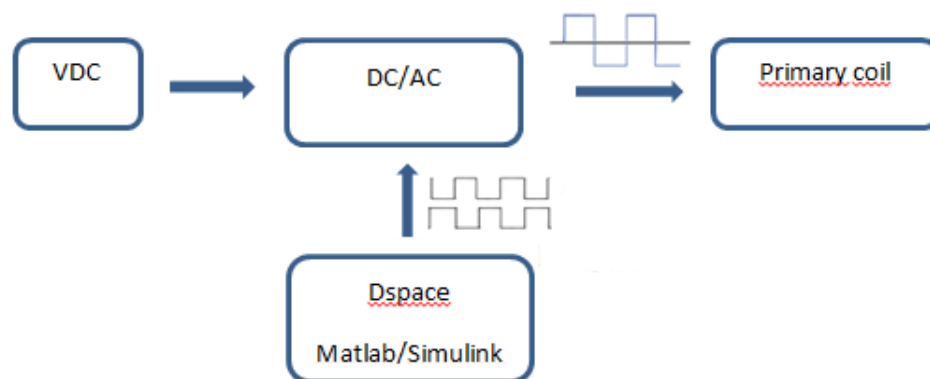


Figura 3. Lado primario del sistema

Para general las dos señales cuadradas que controlan los transistores del convertidor DC/AC, se ha usado un sistema Dspace. Las señales, con un ciclo de trabajo del 50% y un desfase de  $90^\circ$  (Figura 4) entre ellas se modelaron usando un bloque PWM Dspace en Simulink (Figura 5).

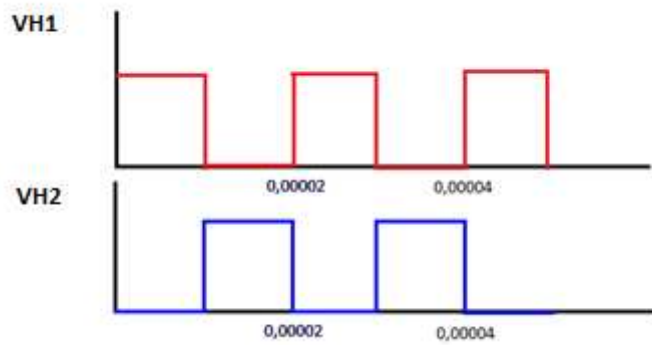


Figura 4. Señales de control

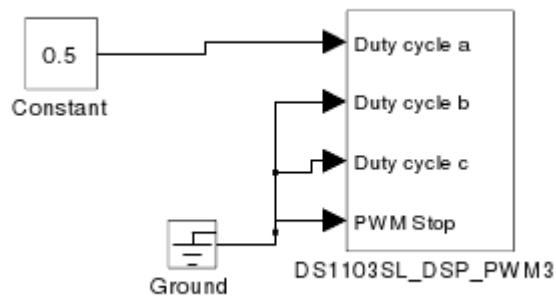
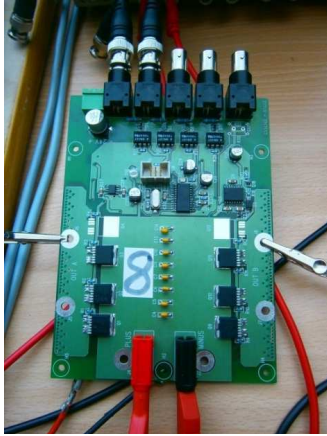


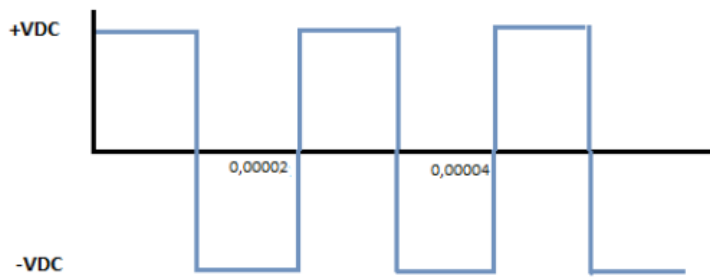
Figura 5. Bloque PWM Dspace de Simulink

El convertidor DC/AC en la Figura 6 consiste en varios medios puentes de MOSFET conectados en cascada.



*Figura 6. Convertidor DC/AC*

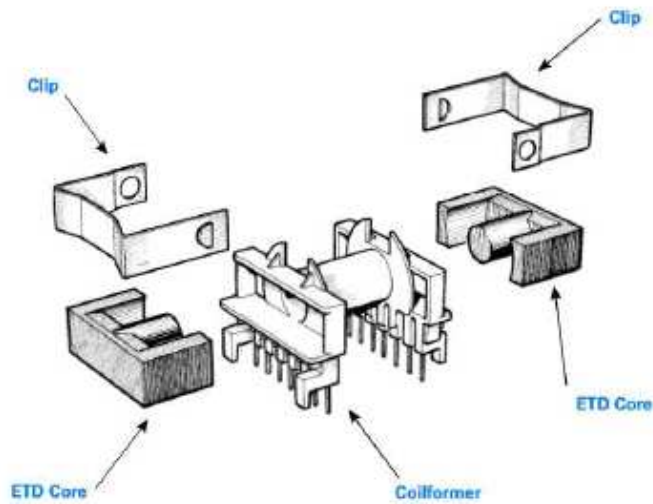
Está alimentado por una tensión constante, VDC, y la salida es una onda cuadrada que oscila entre  $-VDC$  y  $+VDC$ , como podemos ver en la Figura 7.



*Figura 7. Señal de salida del convertidor DC/AC*

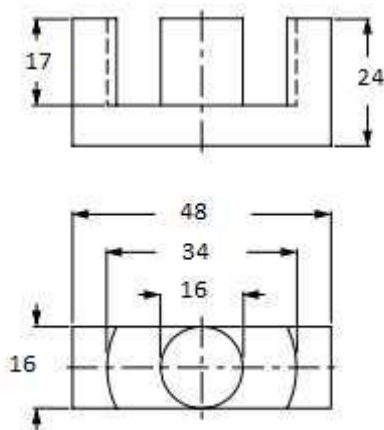
## TRANSFORMADOR

En este proyecto se ha usado un núcleo de ferrita ETD como el que se puede observar en la Figura 8.



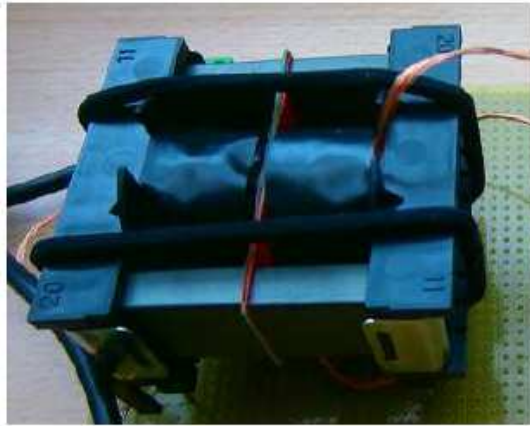
*Figura 8. Núcleo ETD49 con clips y formadores de bobinas.*

Las dimensiones son las siguientes indicadas en la Figura 9.



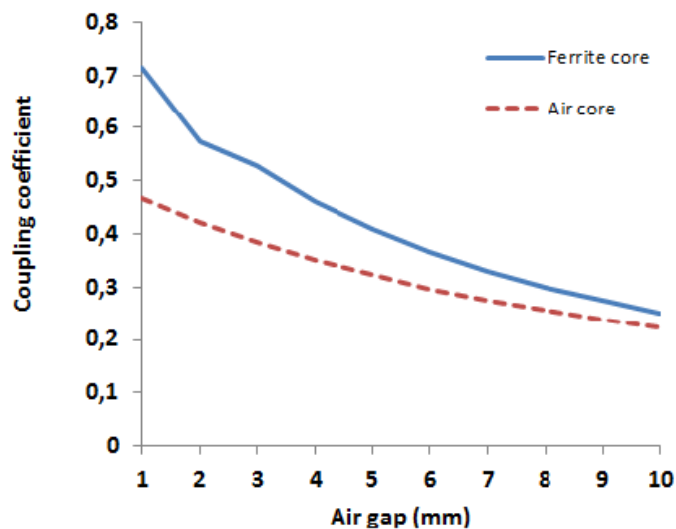
*Figura 9. Vistas del núcleo ETD49 con dimensiones*

El formador de bobina se dividió en dos partes, con el objetivo de dejar un “air gap” entre el primario y secundario del núcleo, lo cual puede observarse en la Figura 10.



*Figura 10. Transformador usado en el laboratorio*

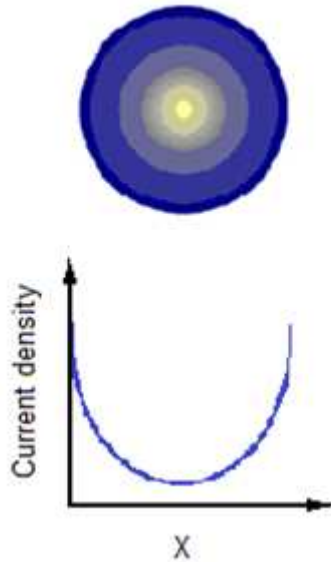
La presencia de un núcleo de ferrita en una aplicación de transferencia de potencia sin contacto puede aportar ventajas debido a su alta permeabilidad, lo que hace que su reluctancia sea más baja, así como a su capacidad para dirigir y conducir el flujo magnético. El acoplamiento entre las bobinas se incrementa y es necesario un número menor de vueltas en las bobinas para conseguir la misma inductancia que si estuviésemos trabajando sin núcleo. De todas maneras, la posibilidad de usar un núcleo de ferrita depende de la aplicación, y a pesar de las ventajas que puede ofrecer no se puede usar en todas las aplicaciones por limitaciones de peso, tamaño...En la Figura 11 se puede ver el decrecimiento del factor de acoplamiento de acuerdo al incremento de la distancia del “air gap” para bobinas en el aire y usando un núcleo de ferrita. Usando un núcleo de ferrita el factor de acoplamiento es mayor.



*Figura 11. Variación del coeficiente de acoplamiento cuando el “air gap” varía para bobinas en el aire y para bobinas arrolladas en un núcleo de ferrita ETD49*



Como cable para formar las bobinas, se ha utilizado un tipo especial de cable, cable Litz. Este cable está formado por varias hebras muy finas de cable, de modo que minimiza las pérdidas debidas al efecto piel, al ser cada hebra más fina que la profundidad de piel ("skin depth"). El efecto piel causa una distribución no homogénea de la corriente en la sección del cable, acumulándose ésta en la superficie de éste, y disminuyendo en el centro. Se puede ver este efecto en la siguiente Figura.



## LADO SECUNDARIO

El lado secundario consiste en la bobina secundaria, un rectificador y la resistencia de carga. El flujo magnético fluye del primario al secundario a través del núcleo de ferrita, donde éste induce una corriente alterna. Esta señal alterna es rectificada por un puente completo de diodos a una señal continua, que finalmente alimenta la resistencia de carga. El esquema de este lado secundario del sistema, así como el montaje real, se pueden observar en las Figuras 12 y 13.

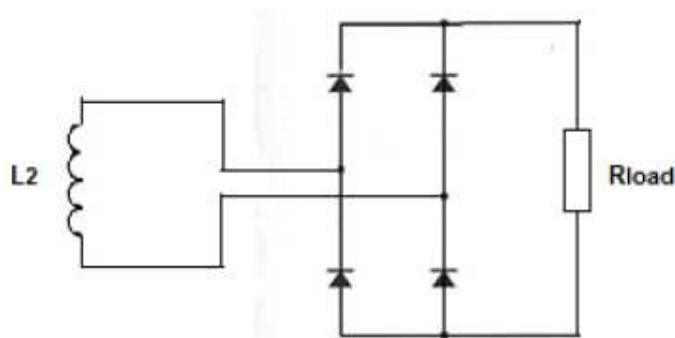
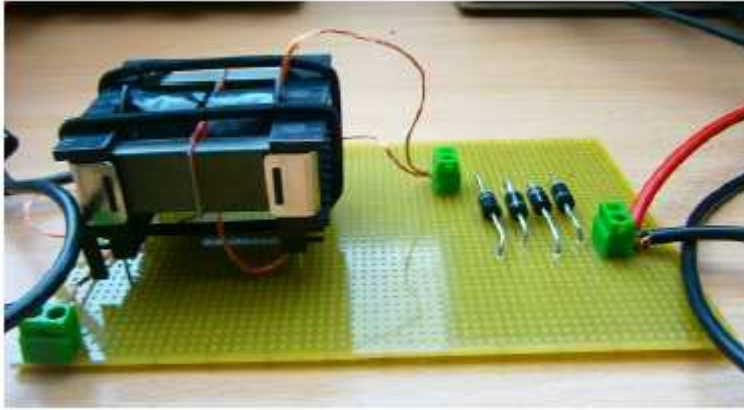


Figure 12. Esquema del lado secundario



*Figura 13. Montaje real del lado secundario*

## ANÁLISIS

### CALCULOS ANALÍTICOS

Es muy complicado realizar cálculos muy precisos de los flujos magnéticos en un circuito magnético. Sería necesario resolver las ecuaciones de Maxwell para condiciones muy específicas y geometrías muy complicadas, lo cual es difícil. Sin embargo, es posible resolver el problema de una forma aproximada simplificando el problema. En la Figura 14 se puede observar la distribución de los diferentes flujos magnéticos a través del núcleo de ferrita cuando hacemos circular corriente por el devanado primario.

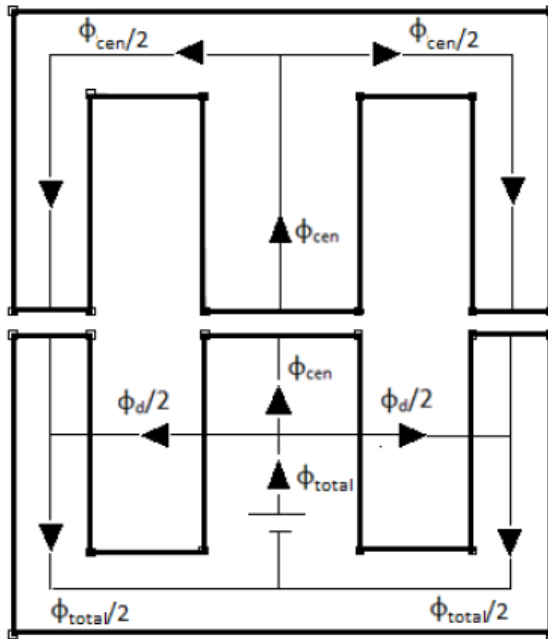


Figura 14. Distribución de los diferentes flujos magnéticos a través del núcleo de ferrita ETD49

Se ha hecho un circuito eléctrico análogo al anterior circuito magnético, con el objetivo de resolver de un modo sencillo éste. Para ello se ha hecho uso de las equivalencias que se pueden establecer entre los circuitos magnéticos y los circuitos eléctricos y que se pueden observar en la Tabla 1.

Electrical circuit	Magnetic circuit
$e$ : f. e. m	$\mathcal{F}$ : f. m. m
$J$ : current density	$B$ : magnetic induction
$\sigma$ : conductivity	$\mu$ : permeability
$E$ : electric field	$H$ : magnetic field
$i$ : electric current	$\Phi$ : magnetic flux
$V$ : electric potential	$U$ : magnetic potential
$R = \frac{1}{\sigma S} l$ : resistance	$\mathcal{R} = R = \frac{1}{\mu S} l$ : reluctance
$\sum e = \sum Ri$	$\sum \mathcal{F} = \sum \mathcal{R}\Phi$
$\sum i = 0$	$\sum \Phi = 0$

Tabla 1. Equivalencias entre circuitos eléctricos y magnéticos

El circuito eléctrico obtenido se puede ver en la Figura 15, donde  $\mathcal{R}_d$  es la reluctancia de dispersión,  $\mathcal{R}_{cen}$  la reluctancia del “air gap” de la columna central y  $\mathcal{R}_{lat}$  la reluctancia del “air gap” de las columnas laterales. Es posible hacer lo mismo con el lado secundario haciendo circular corriente por el devanado secundario; sin embargo, ya que ambos lados del núcleo son simétricos y el número de vueltas de las bobinas primaria y secundaria es el mismo, los valores obtenidos serían los mismos.

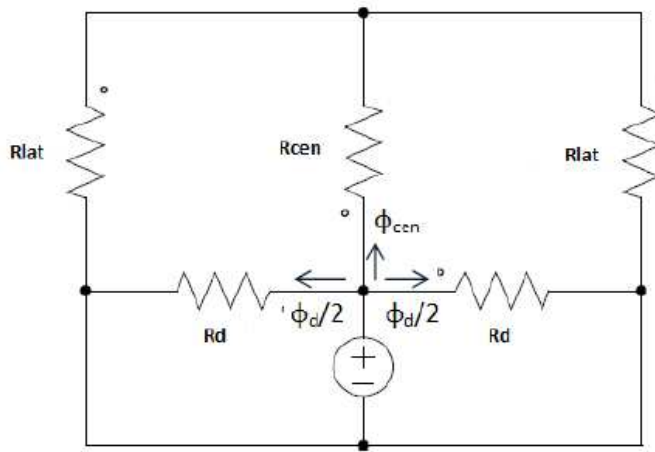


Figura 15. Circuito eléctrico análogo

En este circuito análogo se ha despreciado la reluctancia del núcleo de ferrita porque es mucho menor que la reluctancia del aire, ya que la permeabilidad de la ferrita es sobre mil unidades mayor,

$$\mathcal{R}_{air} = l_{air} / \mu_0 A_{air}$$

$$\mathcal{R}_{core} = l_{core} / \mu_0 \mu_{core} A_{core}$$

$$\mu_{core} \gg \mu_0 \rightarrow \mathcal{R}_{core} \ll \mathcal{R}_{air}$$

Si se simplifica el circuito eléctrico análogo de la Figura 15, llegamos finalmente al simple circuito que se puede ver abajo en la Figura 16.

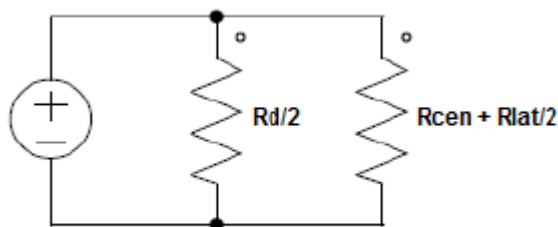


Figure 16. Circuito eléctrico análogo simplificado

Una vez con el circuito simplificado, los valores de las diferentes reluctancias se puede calcular de la siguiente manera,

$$\mathcal{R}_d = l_d / \mu_0 A_d$$

$$\mathcal{R}_{cen} = l_g / \mu_0 A_{cen}$$

$$\mathcal{R}_{lat} = l_g / \mu_0 A_{lat}$$

$$\mathcal{R}_m = \mathcal{R}_{cen} + \mathcal{R}_{lat} / 2$$

Con las reluctancias calculadas es fácil saber los valores de las inductancias del circuito, así como del factor de acoplamiento,

$$L_{1d} = N_1^2 / \mathcal{R}_d / 2$$

$$L_{2d} = N_2^2 / \mathcal{R}_d / 2$$

$$L_{1m} = N_1^2 / \mathcal{R}_m$$

$$L_{2m} = N_2^2 / \mathcal{R}_m$$

$$L_1 = L_{1d} + L_{1m}$$

$$L_2 = L_{2d} + L_{2m}$$

$$M = N_1 N_2 / \mathcal{R}_m$$

$$k = M / \sqrt{L_1 L_2}$$

A la hora de calcular las inductancias, hay que tener en cuenta ciertos efectos, como por ejemplo el efecto que tiene el entrehierro en la distribución del flujo magnético. La presencia del entrehierro o “air gap” supone un incremento del área de conducción efectiva, como puede verse en la Figura 17, y por tanto es necesario hacer ciertas modificaciones para calcular la reluctancia que suponen un pequeño incremento del área efectiva de conducción.

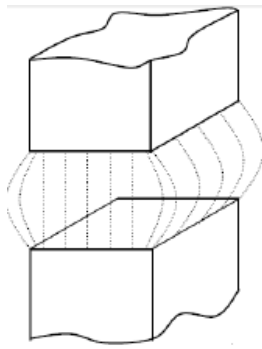


Figura 17

## SIMULACIONES CON FEMM

FEMM (Finite Elements Methods Magnetics) es un programa de elementos finitos para resolver problemas magnéticos y electromagnéticos de dos dimensiones o axisimétricos. Ya que en este caso el problema no es circular, se ha usado un modelo en dos dimensiones y se ha aplicado después una profundidad de 1.6 cm. En la Figura 17 se presenta el modelo realizado con este programa, así como los materiales que se han definido en el programa para poder hacer las simulaciones en la Tabla 2.

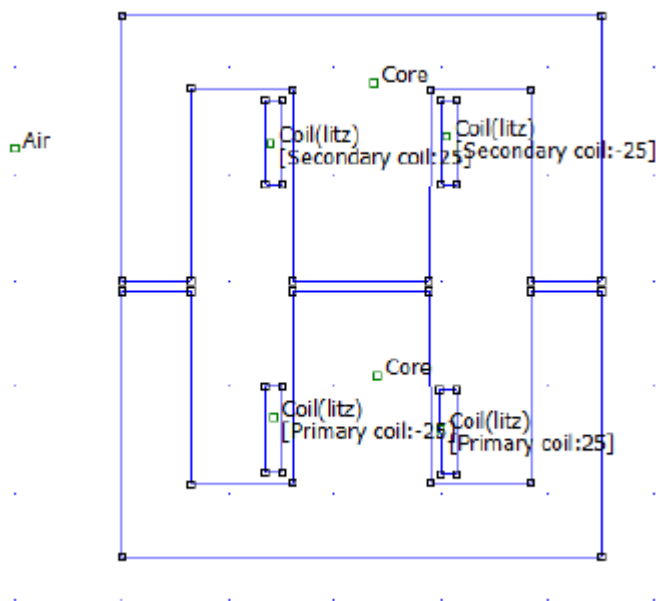


Figura 17. Modelo en FEMM

	Conductivity [MS/m]	Relative permeability
Air	0	1
Core	0	1500
Litz	58.5	1

Tabla 2. Materiales definidos en FEMM

La forma de calcular las inductancias propias y mutuas en FEMM es haciendo circular en el modelo, primero corriente por la bobina primaria, y posteriormente haremos circular corriente al mismo tiempo por la bobina primaria y secundaria. De esta manera conoceremos los enlaces de flujo  $\Psi_{11}$  y  $\Psi_1$ , con los que podremos calcular las inductancias como,

$$L_1 = \frac{\Psi_{11}}{I_1}$$

$$M = \frac{\Psi_1 - \Psi_{11}}{I_1} = \frac{\Psi_{12}}{I_1}$$

Finalmente el factor de acoplamiento se puede calcular como,

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

## MEDIDAS REALES

### ANÁLISIS DE CIRCUITO ABIERTO

El objetivo del test de circuito abierto en la Figura 18 es tomar medidas para el cálculo del coeficiente de acoplamiento,  $k$ , y de la inductancia propia,  $L_1$ .

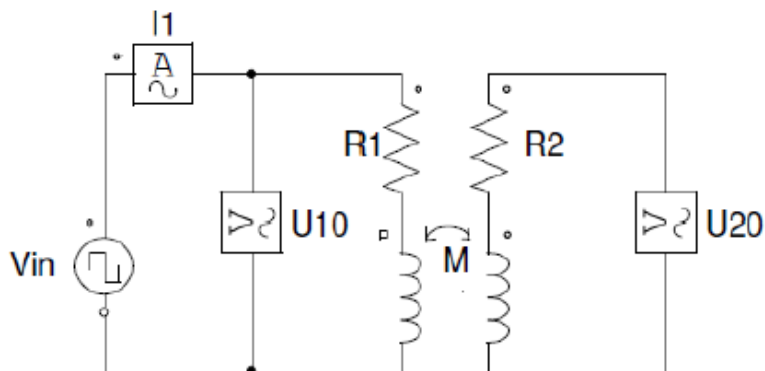


Figura 18. Esquema del test de circuito abierto con sensores utilizados

El coeficiente de acoplamiento expresa la cantidad de flujo magnético creado en la bobina primaria que llega a la bobina secundaria y puede ser calculado como,

$$k = \frac{U_{20}}{U_{10}}$$

Por su parte, la inductancia propia será calculada como,

$$L = \frac{U_{10}}{\omega \cdot I_1} = \frac{U_{10}}{2\pi f \cdot I_1}$$

#### Consideraciones en las medidas

- $V_{in} = 20V_{pp}$
- $f = 50 \text{ kHz}$
- $N_1 = N_2 = N$

#### **RESULTADOS DEL TEST DE CIRCUITO ABIERTO**

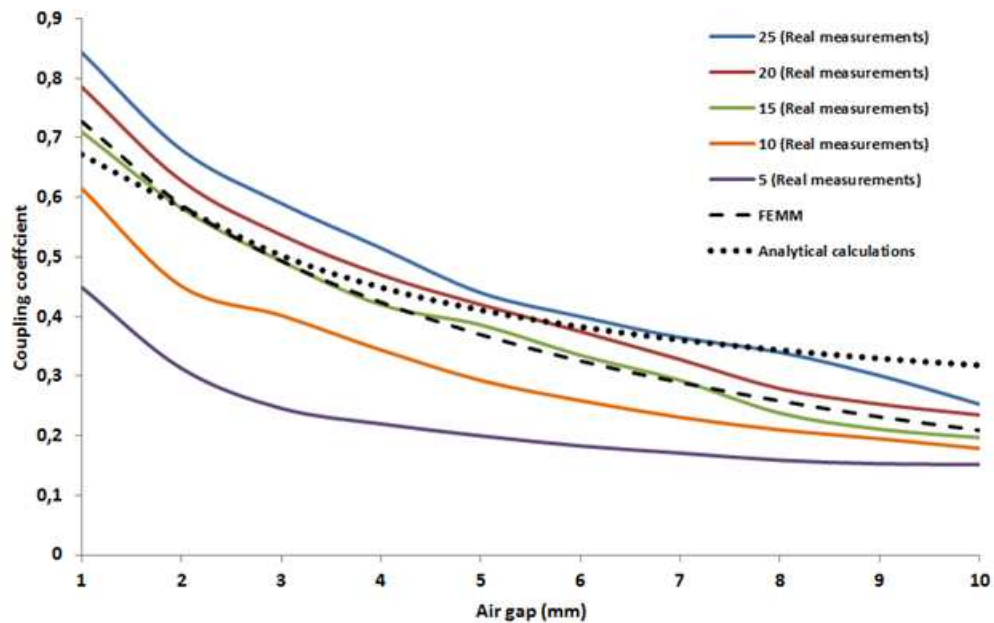


Figura 19. Variación del factor de acoplamiento de acuerdo a la variación del “air gap”



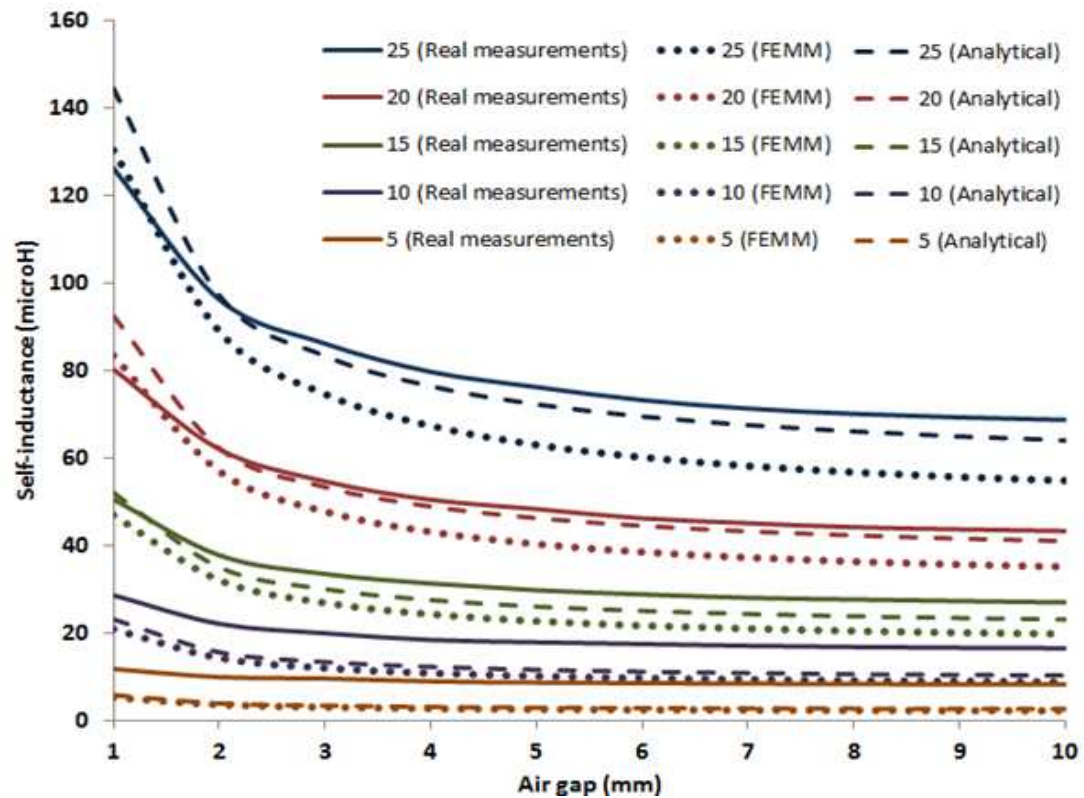


Figura 20. Variación de las auto-inductancias de acuerdo a la variación del air gap

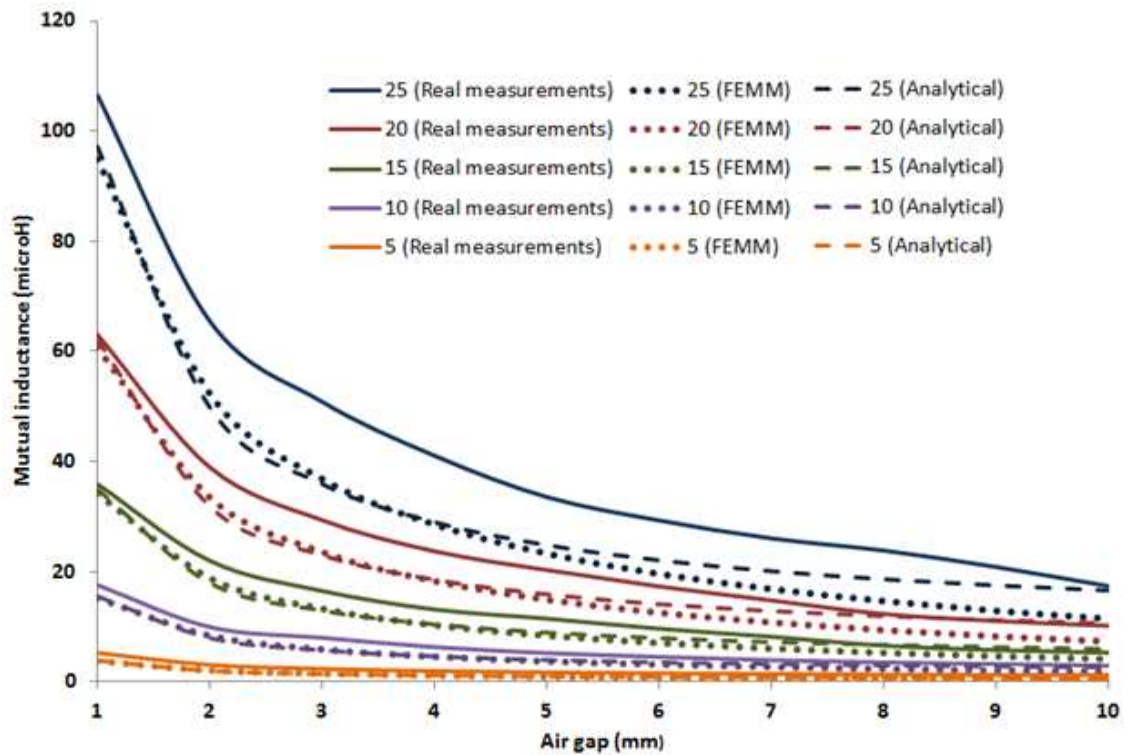


Figura 21. Variación de la inductancia mutua de acuerdo a la variación del air gap

## MEDIDAS CON RESISTENCIA DE CARGA

El circuito montado para estas medidas es el siguiente en la Figura 22.

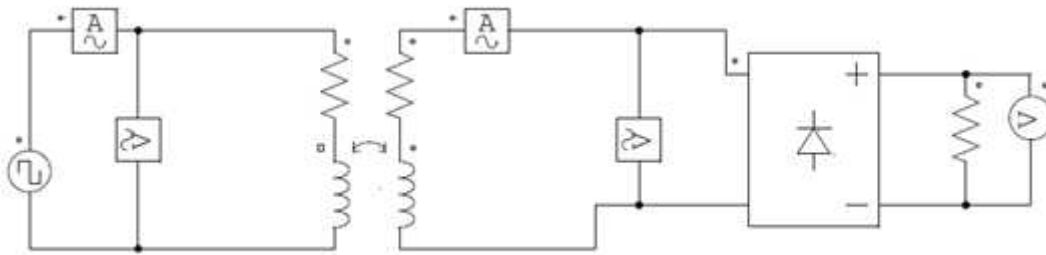


Figura 22. Esquema completo del circuito experimental con los sensores usados indicados.

Los principales resultados que se presentan en este trabajo son los siguientes:

- **Efficiency**

The efficiency has been calculated like:

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \cdot 100$$

where  $P_{\text{output}}$  and  $P_{\text{input}}$  are defined like:

$$P_{\text{output}} = V_{\text{load}} \cdot I_2$$

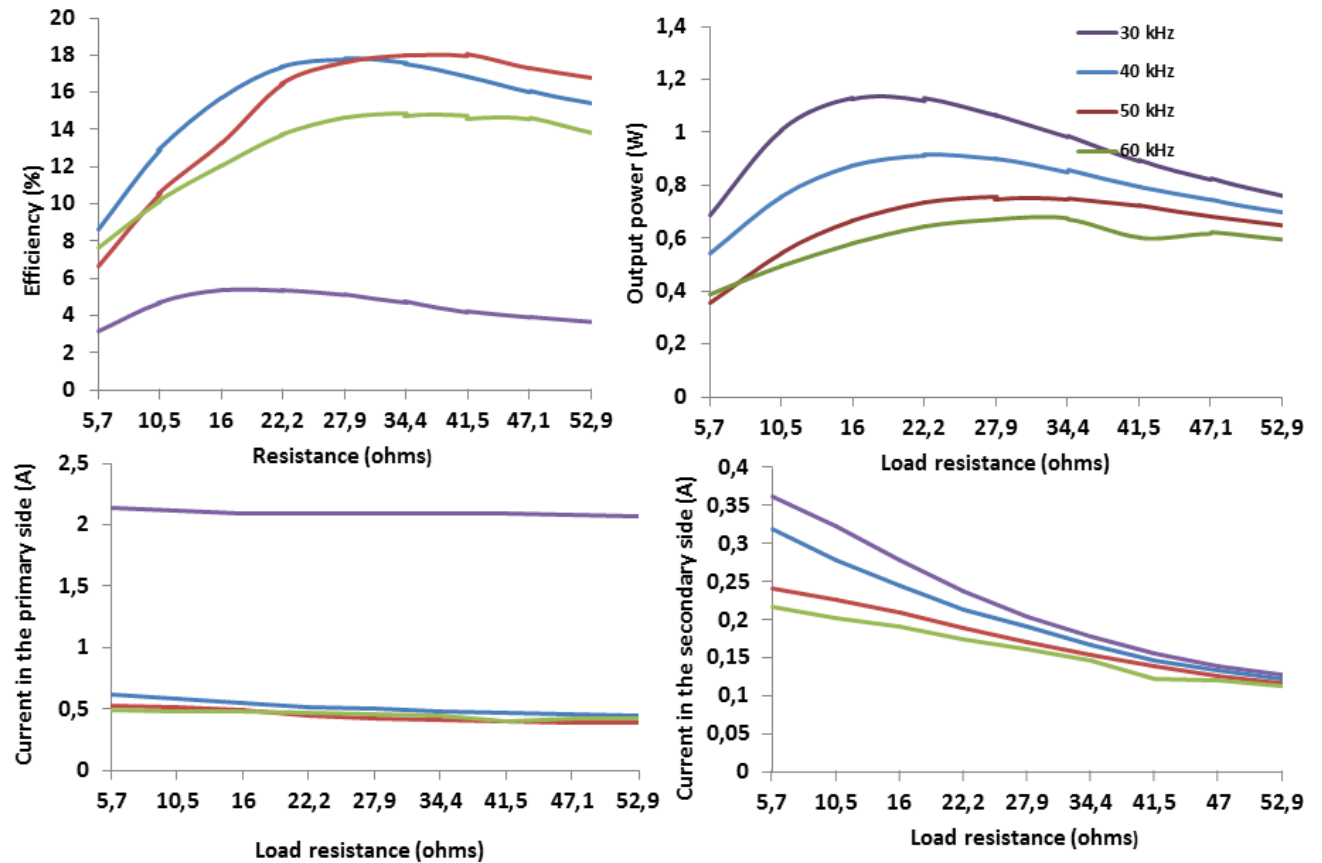
$$P_{\text{input}} = V_1 \cdot I_1$$

$V_{\text{load}}$  is the voltage drop in the load resistance,  $I_2$  is the effective current through the load resistance,  $V_1$  is the input voltage to the primary coil and  $I_1$  the effective current through the primary winding.

- **Output power,  $P_{\text{output}}$**
- **Primary current,  $I_1$**
- **Secondary current,  $I_2$**

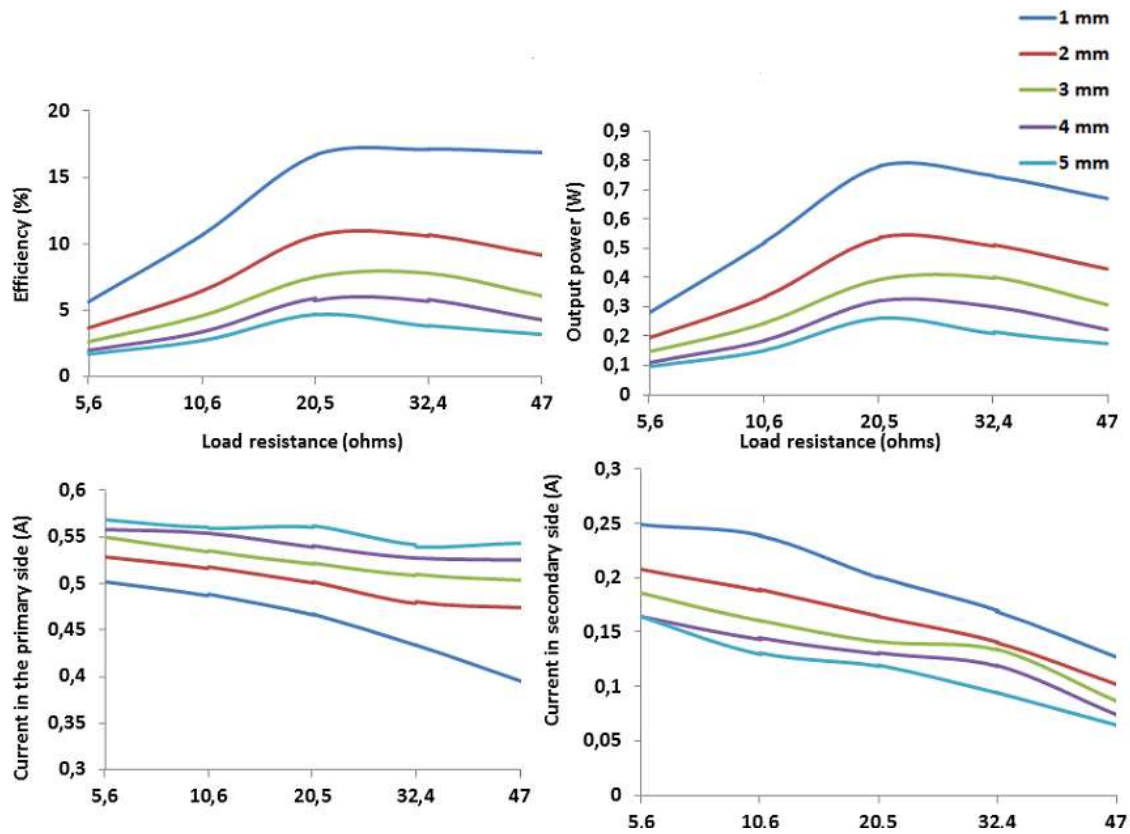
## INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA

Todas las medidas en este epígrafe se han hecho con un número fijo de 25 vueltas en las bobinas y con un "air gap" de 1 mm. Así mismo la tensión en bornes de la bobina primaria se ha mantenido siempre a 20Vpp, siendo por tanto necesario ajustar para cada frecuencia el nivel de continua que se le proporciona al convertidor DC/AC.



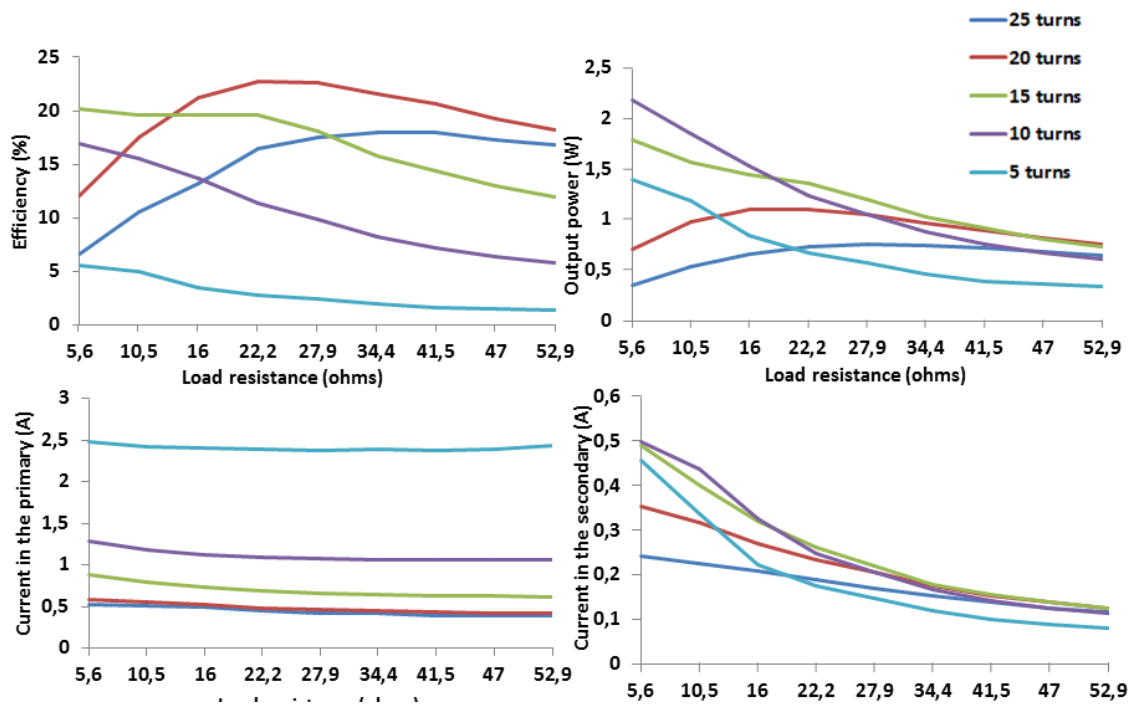
## INFLUENCIA DEL "AIR GAP"

Las medidas se han hecho variando el "air gap" desde 1 a 10 mm para conocer la influencia de este parámetro. El resto de parámetros, número de vueltas y frecuencia se mantienen fijos a 25 vueltas y 50 kHz, así como la tensión en bornes de la bobina primaria a 20 Vpp.



### INFLUENCIA DEL NÚMERO DE VUELTAS

En este caso, como en los anteriores, se han fijado el resto de parámetros. El “air gap” se ha fijado a 1mm, la frecuencia a 50 kHz, y la tensión en bornes de la bobina primaria se ha fijado a 20Vpp. El número de vueltas se ha variado de 5 a 25 vueltas, de 5 en 5.



## CONCLUSIONES

La principal conclusión de este proyecto es que es posible hacer bastante buenas aproximaciones de los parámetros magnéticos que definen un sistema de transferencia de energía inalámbrica, tales como auto-inductancias, inductancias mutuas y coeficiente de acoplamiento, con simples cálculos analíticos o simulaciones en FEMM de sistemas muy sencillos. Aunque es difícil lograr resultados precisos con este método debido a la complejidad del problema, en este trabajo se llega a resultados bastante tolerables, por lo tanto, si se desarrolla un método de cálculo más complejo, se podrán lograr resultados aún mejores.

Las otras conclusiones principales conciernen a la parte práctica de este proyecto. La conclusión general que se puede deducir de estos experimentos es que los parámetros de diseño influyen fuertemente en el sistema, por lo que es extremadamente importante en un sistema de transmisión de potencia sin contacto, tener un buen entendimiento del diseño del “transformador” porque es una de las partes del sistema donde las pérdidas son más considerables, además de las pérdidas en el inversor.